干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

高速铁路背景下西北地区铁路可达性与空间相互作用格局变化分析

张富涛， 钱勇生， 曾俊伟， 广晓平
（兰州交通大学交通运输学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：西北地区是丝绸之路经济带建设的境内外重要结合点。通过考虑各城市铁路交通流的异质性，以西北各市（州）主要城市为研究单元，重要高铁线路开通时间为断面，以2011、2015年和2019年为时间节点，利用列车频次可达性测度方法与标准引力模型，采用列车频次加权平均旅行时间以及经济联系总量和经济联系强度等指标，对其铁路可达性及城市空间相互作用进行分析。结果表明：(1) 铁路可达性及城市间经济联系强度整体上提升明显，高铁沿线更为显著，受列车频次的影响较大。(2) 全区铁路可达性总体上东西梯度差异显著，向西北方向逐渐递减。各省（自治区）局部表现为以省会城市为中心，以铁路枢纽城市为次中心的圈层结构。(3) 全区空间相互作用由传统的"极核式"转变为以枢纽城市为节点，以陇海线、宝兰线、兰新线等主干铁路为轴线纵向延伸的"点轴式"，进而初步形成一定的"网络式"格局。各省（自治区）内部"区域中心城市—外围城市—边缘城市"经济联系总量梯度结构明显。深入剖析地区可达性及经济联系分布格局，建议应该进一步加强铁路建设，尤其是扩大边缘地区铁路网覆盖面，统筹东西梯度发展，非高铁沿线城市需要加强与沿线城市的交通接驳建设，积极主动融入高铁网络。

关 键 词：高速铁路；铁路可达性；空间相互作用；西北地区
文章编号：

轨道交通作为交通运输网络的主干，尤其是高速铁路以其快速便利的时空传递性，提升了沿线城市的可达性，对区域经济空间分布格局的影响意义深远[1]。近年来，学者们在宏观尺度、城市内部等微观尺度上[2-4]对可达性与经济联系强度之间密切的协同作用进行了研究，涉及的内容主要包括经济联系结构演化[2]、可达性及经济联系格局[4]，城市空间相互作用[5]等。在研究可达性的方法上，则主要采用空间和时间距离等传统的可达性模型，空间距离忽略了道路等级和车速等带来的影响。因此，基于时间距离的加权平均旅行时间目前被广泛运用于陆路可达性测度。覃成林等[6]通过分析中国铁路交通发展对沿线城市经济增长趋同的影响时，认为传统的可达性测度方法未考虑城市铁路交通量的差异性，难以真实反映可达性水平。在研究可达性对地区经济社会溢出效应的影响方面，叶燕霞[7]通过分析高铁可达性对广东省经济的影响发现可达性与地区GDP、三次产业产值以及旅游收入具有显著正相关。周倩等[8]在研究长株潭城市群路网可达性分布与经济发展水平空间分布的空间耦合协调时，发现交通系统对两者的协调发展具有显著影响。

此外，鄢慧丽等[9]在研究中国"四纵四横"高铁对沿线站点城市可达性及其经济联系的影响时，同样验证了高铁开通带来的可达性变化能够明显改善沿线站点城市的经济联系。在研究地域方面，一些学者对西部地区交通网络以及经济联系展开了

收稿日期：2020-10-15； **修订日期**：2021-03-13
基金项目："交通一体化对西部地区新型城镇化影响的动力学特征研究"（14CJY052）；"丝绸之路经济带多维轨道交通对新型城镇化的时空形态演进优化研究"（15BJY037）资助
作者简介：张富涛（1996-），男，在读硕士研究生，主要从事交通运输规划与管理研究. E-mail: 1067917196@qq.com
通讯作者：钱勇生（1970-），男，教授，主要从事交通运输规划与管理、安全技术与工程研究. E-mail: qianyongsheng@mail.lzjtu.cn

深入研究，但研究内容仍较少。例如效瑞等[10]利用加权平均旅行时间、等时圈、经济潜力和空间变差函数等模型，综合分析了兰新高铁运营前后沿线县域可达性时空收敛效应和经济潜力特征变化。高玉祥等[11]以宁夏的交通路网数据为基础，通过设置阻抗改进网络分析法，研究了全区路网的空间结构特征。

综上，国内关于轨道交通对经济驱动的实证研究，大多集中在东部地区，而对西部地区的研究相对较少[12]。2014年底，兰新高铁正式通车，标志着西北地区真正意义上迎来了高铁时代。随后，中川城际，宝兰客专、西成客专以及银兰客专银中段正式通车，西北地区高铁线路网密度进一步提升。因此本文在传统的可达性基础上，参考学者唐恩斌等[13]的研究成果，考虑到各城市铁路交通量的差异性，补充考虑站点规模这一因素，将列车频次数的变化作为量化参考指标，对高铁背景下西北地区铁路可达性及空间相互作用进行分析，以期对交通网络结构优化布局提供参考借鉴。

1 研究方法及数据

1.1 研究方法

1.1.1 铁路可达性模型

（1）铁路加权平均旅行时间

可达性与城市地理区位、经济发展水平和城市规模联系密切。本文选用铁路加权平均旅行时间，通过给最短旅行时间赋予经济权重，强化经济发展与可达性之间的联系，对城市可达性水平反映更为客观，该指标越大，说明该城市可达性越低[7,14-15]。

$$M_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} T_{ij} \times P_j}{\sum_{j=1}^{n} P_j} \tag{1}$$

$$P_j = \sqrt{\mathrm{GDP}_j \times \mathrm{POP}_j} \tag{2}$$

式中：M_i 为城市 i 的铁路加权平均旅行时间(min)；T_{ij} 为城市 i 与城市 j 之间的最短铁路旅行时间(min)；n 为网络中的节点数量；P_j 为城市 j 的城市质量，反映该城市的经济辐射能力和吸引力，选取地区生产总值GDP(10^8元)和常住人口数POP(10^4人)，按照式(2)构造城市质量。

（2）铁路频次加权平均旅行时间

考虑到城市铁路交通流量的异质性，在传统铁路加权平均旅行时间的基础上，将列车站点规模因素考虑在内，更能准确的测度城市的可达性水平，该指标越大表示城市可达性水平越低[13-15]。

$$N_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} T_{ij} \times P_j \Big/ \sum_{j=1}^{n} P_j}{n_i} \tag{3}$$

式中：N_i 为城市 i 的铁路频次加权平均旅行时间(min·次$^{-1}$)；n_i 为城市 i 的铁路站点每日列车频次数(次·d^{-1})，在数值上等于该城市列车站点每日出发、经停和到达的列车频次之和。

1.1.2 空间经济结构模型

（1）引力模型

本文应用引力模型计算城市之间的经济联系强度，来表征城市间的相互作用情况。它既能反映经济中心对周围地区的辐射能力也能反映周围地区对这一辐射能力的接受程度[16]。

$$L_{ij} = \frac{P_j \times P_i}{T_{ij}^{\,2}} \tag{4}$$

式中：L_{ij} 为城市 i 与城市 j 之间的经济联系强度；P_i 和 P_j 分别为城市 i 与城市 j 的城市质量。T_{ij} 为城市 i 与城市 j 之间的最短铁路旅行时间(min)。

（2）经济联系总量

城市对外经济联系总量反映了某一城市对外流的总和。本文计算城市 i 的经济联系总量 L_i，来表征城市 i 在整个地区经济网络中所处的地位。该值越大表示城市的对外经济联系总量越大，经济地位显著[8]。

$$L_i = \sum_{j=1}^{n-1} L_{ij} \tag{5}$$

式中：L_i 为城市 i 的经济联系总量；n 为样本城市数量；L_{ij} 为城市 i 与城市 j 之间的经济联系强度。

1.2 数据来源

本文以西北地区甘肃省、青海省、陕西省、新疆维吾尔自治区和宁夏回族自治区为研究区域。各市(地区、自治州)主要城市之间的铁路最短时间及各站点列车频次从《中铁时刻表软件》(2011.07.08版)、盛名时刻表软件(2015.12.18版)及12306官网获得。各城市的常住人口数及国民生产总值来自于对应年份的《统计年鉴》或《政府统计公报》。本文所选取的地区生产总值、常住人口数均为市辖区

数据而非全市。列车站点频次数据为市辖区站点，研究区域如图1所示。

2 西北地区城市铁路可达性分析

基于改进的可达性模型，应用公式(3)，测度主要城市的铁路频次加权平均旅行时间 N 及变化情况。为在比较铁路可达性以及列车频次 n 的变化幅度时更具有可比性，列举了3个时间断面下市辖区内均有列车站点的城市，如表1所示。表中各符号的表示意义与模型一致，Δ 表示各指标的变化率，下同。

2.1 铁路可达性总体格局

西北五省(自治区)全区铁路可达性总体呈现出明显的东西梯度差异，各省(自治区)局部表现为省会城市为核心，以铁路枢纽城市为次中心的“圈层”结构。西北地区进入高铁时代后，地区整体铁路可达性水平不断提升，但不同时段内仍有部分城市铁路可达性水平有所降低。铁路可达性的提升与列车频次相关性较强。2011—2015年，西北地区列车开行频次由原来的1394 次·d^{-1}提升至3437 次·d^{-1}，增加率为146.56%，铁路频次加权平均旅行时间由4579 min·次$^{-1}$降低至2475 min·次$^{-1}$，提升率为45.95%。随着兰新高铁、宝兰客专、西成客专的相继运营，2019年，列车开行频次较2015年增加率约为78.88%，铁路可达性提升较之前更为明显，铁路频次加权平均旅行时间由2475 min·次$^{-1}$降低至787 min·次$^{-1}$，可达性提升率为68.20%。

2.2 铁路可达性时空分布特征差异

2.2.1 东西梯度差异特征明显 以西安为核心的关中平原城市群和以兰州、西宁为双核心的兰西城市群，高铁网络效应显著，铁路可达性趋于均衡。沿着河西走廊，兰州以西地区，其铁路可达性比较关中地区，无论是路网覆盖率还是路网功能结构都存在较大的差距。2011—2015年，铁路可达性排名前10的城市大多位于陕西大部和甘肃东部，位于西部边缘地区的大多城市可达性偏低。2019年，铁路可达性东西梯度差异格局并未发生明显的改变，但部分位于高铁沿线的嘉峪关、张掖、乌鲁木齐等西部城市跻身前10的行列中。

2.2.2 高速铁路影响范围有限，且具有较强的“廊道效应” 兰新高铁开通前，铁路可达性值整体偏低。2011年，地区频次加权平均旅行时间为4580 min·次$^{-1}$。高铁开通后，各城市铁路可达性均有明



图1 西北五省研究区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of five provinces in northwest China

表1　基于频次加权平均旅行时间的西北地区主要城市铁路可达性

Tab. 1　Railway accessibility of major cities in the northwest region based on frequency-weighted average travel time

节点	2011年		2015年		2019年		2011—2015年		2015—2019年	
	N_i	n_i	N_i	n_i	N_i	n_i	ΔN_i/%	Δn_i/%	ΔN_i/%	Δn_i/%
兰州	5.95	113	1.77	312	0.57	722	70.25	176.11	67.80	131.41
嘉峪关	24.37	38	5.19	134	1.72	301	78.70	252.63	66.86	124.63
金昌	22.39	34	12.17	58	8.98	73	45.65	70.59	26.21	25.86
白银	43.19	16	10.89	56	15.25	31	74.79	250.00	−40.04	−44.64
天水	10.91	64	6.61	100	1.41	350	39.41	56.25	78.67	250.00
武威	14.70	49	7.22	98	4.48	146	50.88	100.00	37.95	48.98
张掖	24.36	34	4.56	141	3.33	152	81.28	314.71	26.97	7.80
平凉	39.64	22	28.09	30	33.91	20	29.14	36.36	−20.72	−33.33
酒泉	32.22	29	7.21	100	6.30	86	77.62	244.83	12.62	−14.00
定西	17.07	40	10.44	62	3.55	156	38.84	55.00	66.00	151.61
西安	4.10	213	1.22	632	0.56	1417	70.24	196.71	54.10	124.21
宝鸡	5.80	118	2.79	234	1.40	426	51.90	98.31	49.82	82.05
渭南	7.70	87	3.29	243	1.59	428	57.27	179.31	51.67	76.13
咸阳	12.13	61	6.61	118	5.17	126	45.51	93.44	21.79	6.78
延安	44.48	18	11.90	53	9.52	68	73.25	194.44	20.00	28.30
汉中	54.85	19	41.30	27	2.93	237	24.70	42.11	92.91	777.78
榆林	66.03	16	29.93	30	22.84	37	54.67	87.50	23.69	23.33
安康	14.72	73	6.11	159	5.61	128	58.49	117.81	8.18	−19.50
商洛	71.67	10	86.89	11	29.98	25	−21.24	10.00	65.50	127.27
银川	32.40	29	13.84	62	12.79	65	57.28	113.79	7.59	4.84
固原	59.43	14	50.47	16	47.10	15	15.08	14.29	6.68	−6.25
中卫	32.17	27	12.99	54	11.24	61	59.62	100.00	13.47	12.96
吴忠	46.37	19	29.22	28	27.35	31	36.99	47.37	6.40	10.71
海东	70.58	10	22.46	27	11.97	36	68.18	170.00	46.71	33.33
西宁	16.14	45	5.65	106	4.25	106	64.99	135.56	24.78	0.00
海西	60.16	21	56.42	18	32.60	31	6.22	−14.29	42.22	72.22
乌鲁木齐	28.93	51	4.88	240	3.86	283	83.13	370.59	20.90	17.92
吐鲁番	33.13	39	8.28	123	4.51	231	75.01	215.38	45.53	87.80
哈密	35.80	31	11.65	77	8.17	104	67.46	148.39	29.87	35.06
阿克苏	232.89	10	111.20	12	45.33	38	52.25	20.00	59.24	216.67
喀什	368.97	6	249.97	6	72.84	29	32.25	0.00	70.86	383.33
和田	1425.82	2	1010.85	2	139.66	15	29.10	0.00	86.18	650.00
石河子	130.58	14	45.73	28	19.41	65	64.98	100.00	57.56	132.14
库尔勒	159.65	14	67.94	22	23.88	56	57.44	57.14	64.85	154.55
伊宁	937.11	2	143.53	12	42.88	36	84.68	500.00	70.12	200.00
阿图什	393.43	6	346.04	6	120.26	17	12.05	0.00	65.25	183.33
总计	4580.00	1394	2475.00	3437	787.00	6148	45.95	146.56	68.20	78.88

注：N_i为城市i的铁路频次加权平均旅行时间(min·次$^{-1}$)；n_i为城市i的铁路站点每日列车频次数(次·d^{-1})；ΔN_i和Δn_i分别为以上两指标对应的变化率。

显提升。2015年，铁路可达性最好的城市为西安（1.22 min·次$^{-1}$），最差的是和田（1010.85 min·次$^{-1}$），可达性提升具有明显的交通指向性，变化幅度大的地区主要集中在高铁线路附近。兰新高铁沿线城市铁路可达性提升率均在50%以上，远超地区平均水平。2019年，宝兰客专沿线城市宝鸡、天水、定西可达性提升率分别为49.82%、78.67%、66.00%。由于高铁有限的影响范围，在沿线城市铁路可达性水平趋于均衡的同时，也拉大了沿线城市与非沿线城市之间铁路可达性的差距。变化幅度小的城市主要集中在新疆维吾尔自治区西部、南部和青海省部分地区，未来有可能被进一步边缘化。

2.2.3 城市铁路可达性提升与站点列车频次数增加相关性较强 铁路站点的规模也是影响城市铁路可达性的重要因素。根据西北地区城市铁路可达性的测度结果，无论从整体还是分时段来看，铁路可达性与列车频次之间的变化具有极大的联系。从铁路可达性变化率来看，提升率位居前列的城市，其列车频次变化率也位居前列，而大部分铁路可达性水平降低的城市，其列车频次均为负增长。作为列车频次增长率最高的汉中，列车频次由2015年的27次·d^{-1}提升到2019年的237次·d^{-1}，频次增长率达到了近8倍，铁路可达性提升率达到了92.91%。与此同时，酒泉和平凉的列车频次均有下降，但与平凉铁路可达性下降20.72%相比，酒泉可达性反而提升12.62%，这表明城市铁路可达性也与其城市发展规模和地理区位有关。

3 基于铁路可达性的西北地区城市空间相互作用分析

应用公式（4）和公式（5）计算主要城市间的经济联系强度 L_{ij}（均扩大10倍）和经济联系总量 L_i，对经济联系强度 L_{ij} 前35位进行排序，如表2所示。

3.1 空间相互作用总体格局

3.1.1 西北地区空间相互作用总体格局转变 交通条件的改变不仅导致了城市铁路可达性变化，而且影响着城间作用度的变化。2011年前后，西北地区城市间经济联系总体呈现出一种“极核”式的格局。随着铁路的修建和经济的发展，2015—2019年

表2 西北地区主要城市空间经济联系强度及方向

Tab. 2 Intensity and direction of spatial economic relations among major cities in northwest China

节点	2011年		2015年		2019年		2011—2015年	2015—2019年
	L_i	L_{ij}	L_i	L_{ij}	L_i	L_{ij}	ΔL_i /%	ΔL_i /%
兰州	32.15	西安—咸阳（11132）	120.29	西安—咸阳（35928）	260.51	西安—咸阳（35925）	274.15	116.57
嘉峪关	17.92	西安—渭南（5664）	44.17	西安—宝鸡（2021）	60.12	西安—渭南（22553）	146.48	36.11
金昌	5.88	西安—宝鸡（891）	9.55	西宁—海东（640）	14.77	西安—宝鸡(4215)	62.41	54.66
白银	7.49	宝鸡—咸阳（107）	12.66	兰州—西宁(504)	20.62	西安—兰州（825）	69.03	62.88
天水	8.97	咸阳—渭南（66）	16.89	咸阳—宝鸡（405）	164.99	西安—汉中（682）	88.29	876.85
武威	9.52	兰州—白银（60）	14.77	酒泉—嘉峪关（397）	24.63	西安—天水（631）	55.15	66.76
张掖	2.84	兰州—西宁（56）	11.65	兰州—海东（243）	15.08	咸阳—宝鸡（592）	310.21	29.44
平凉	2.37	兰州—定西（43）	3.60	西安—延安（128）	9.77	兰州—定西（503）	51.90	171.39
酒泉	17.96	西安—商洛（41）	45.29	兰州—白银（88）	9.77	天水—宝鸡（476）	152.17	−78.43
定西	5.70	西安—兰州（39）	8.86	西安—天水（67）	68.24	渭南—咸阳（328）	55.44	670.20
西安	1792.22	银川—吴忠（38）	4722.20	金昌—武威（62）	6566.42	兰州—天水（297）	163.48	39.05

续表 2

节点	2011年		2015年		2019年		2011—2015年	2015—2019年
	L_i	L_{ij}	L_i	L_{ij}	L_i	L_{ij}	ΔL_i /%	ΔL_i /%
宝鸡	109.51	西安—延安（38）	263.62	兰州—定西（60）	582.22	兰州—宝鸡（209）	140.73	120.86
咸阳	1133.43	宝鸡—天水（27）	3611.20	兰州—西安（56）	3706.57	渭南—宝鸡（202）	218.61	2.64
渭南	576.88	西安—安康（25）	901.58	兰州—宝鸡（54）	2326.00	延安—西安（185）	56.29	157.99
延安	5.13	西宁—海东（25）	17.34	兰州—武威（34）	25.01	兰州—西宁（173）	238.01	44.23
汉中	1.26	兰州—海东（24）	1.86	宝鸡—天水（33）	81.20	海东—兰州（161）	47.62	4265.59
榆林	1.66	宝鸡—渭南（21）	5.13	西宁—张掖（27）	7.02	安康—西安（130）	209.04	36.84
安康	4.92	西安—天水（21）	11.33	西宁—银川（26）	18.95	兰州—白银（116）	130.38	67.26
商洛	5.88	兰州—武威（19）	11.62	兰州—天水（24）	11.04	金昌—武威（106）	97.62	−4.99
银川	6.54	兰州—天水（17）	95.56	兰州—张掖（23）	79.78	西安—西宁（94）	1361.16	−16.51
固原	1.56	兰州—宝鸡（15）	2.65	西安—西宁（20）	4.52	西安—商洛（86）	69.87	70.57
中卫	2.88	武威—安康（11）	7.33	张掖—酒泉（17）	8.05	西安—定西（67）	154.51	9.82
吴忠	5.37	西安—西宁（8.7）	27.94	兰州—银川（16）	28.55	天水—咸阳（62）	420.30	2.18
海东	5.77	西安—平凉（8.2）	91.93	兰州—乌鲁木齐（12）	66.95	兰州—咸阳（58）	1493.24	−27.17
西宁	10.80	西安—榆林（7.9）	130.06	张掖—嘉峪关（12）	87.89	兰州—天水（54）	1104.26	−32.42
海西	0.37	银川—中卫（7.3）	1.01	宝鸡—延安（11）	1.42	兰州—武威（51）	172.97	40.59
乌鲁木齐	7.27	兰州—金昌（6.2）	46.21	兰州—酒泉（10）	91.88	兰州—渭南（47）	535.63	98.83
吐鲁番	1.96	中卫—吴忠（6.1）	21.40	天水—咸阳（9.6）	21.63	海东—西安(45)	991.84	1.07
哈密	1.01	西安—汉中（5.9）	5.67	兰州—延安（9.4）	10.07	咸阳—汉中（42）	461.39	77.60
阿克苏	0.20	天水—咸阳（5.5）	1.65	兰州—金昌（8.9）	1.06	天水—渭南（41）	725.00	−35.76
喀什	2.52	金昌—张掖（5.2）	6.39	酒泉—西宁（8.9）	9.42	渭南—汉中（36）	153.57	47.42
和田	0.05	武威—张掖（5.1）	0.14	兰州—海北（8.9）	1.06	西安—榆林（35）	180.00	657.14
石河子	3.88	咸阳—商洛（4.9）	16.12	兰州—嘉峪关（8.3）	47.00	白银—西安（33）	315.46	191.56
库尔勒	0.78	宝鸡—商洛（4.7）	3.82	张掖—武威（8.1）	6.92	西宁—张掖（31）	389.74	81.15
伊宁	0.11	兰州—咸阳（4.6）	0.73	银川—榆林（8.1）	2.97	武威—张掖（27）	563.64	306.85
阿图什	2.44	武威—西安（4.2）	5.31	西安—乌鲁木齐（7.7）	8.91	定西—宝鸡（25）	117.62	67.80
总计	3795.20	-	10297.53	-	14451.01	-	171.33	40.33

注：L_i 为城市 i 的经济联系总量；L_{ij} 为城市 i 与城市 j 之间的经济联系强度；ΔL_i 为城市 i 的经济联系总量的变化率。

城市间相互作用格局逐步转变为"点轴"模式，具体表现为以兰州、西安、银川、西宁、乌鲁木齐等枢纽城市为节点向周边辐射扩散，以陇海线、兰新线等主干铁路和高铁通道为轴纵向延伸。随着国家中长期铁路网规划和"十三五"规划的收官，各城市经济联系愈发加强，吐鲁番、哈密、喀什等地开始跻身核心城市行列，对周边城市的辐射能力日益显著。截止2019年底，西北地区已经初步形成一定的"网络"式格局。从具体计算数值看，2011—2015年西北地区经济联系总量提升171.33%，2015—2019年提升率也达40.33%。

3.1.2 各省（自治区）空间相互作用分析 甘肃省位于西北地区的中心地带，基本形成了以兰州为中心，以陇海线、兰新线为主轴，以西平线和干武线等线路为支撑的"X"形路网主骨架。兰州位于铁路网中心位置，依托其便利的可达性，其经济联系总量在省内排名第一。2015年，兰新高铁开通之前，省内东部天水、白银等城市经济联系总量整体上大于西部城市。兰新高铁开通之后，酒泉、嘉峪关、张掖等城市依托高铁的便利性，经济联系总量总体上超过东部城市。2015—2019年，宝兰客专和中川城际等相继开通，改善了铁路运输条件，沿线城市天水、定西经济联系总量提升程度均在6倍以上。但甘肃省内未连通高铁的陇南、平凉以及甘南，经济联系总量排名靠后。

陕西省高铁网络密集程度相对较高，随着以西安为中心、以榆林、延安、安康、汉中、宝鸡等为节点的"一核多极"综合交通运输体系的建设，2011—2019年，西安经济联系总量由1792.22提高至6566.42，在陕西省处于中心地位。宝鸡、咸阳、渭南紧邻西安，受中心辐射能力较强，此外得益于西成客专和宝兰客专等的建设开通运营，2019年经济联系总量已分别达到582.22、3706.57、2326.00，较2015年分别提升120.86%、2.64%和157.99%，经济联系总量处于省内前列。

新疆维吾尔自治区和宁夏回族自治区的经济联系总量"区域中心城市—外围城市—边缘城市"梯度结构明显。省会城市以及部分铁路枢纽城市，由于其是重要的中心节点或高速铁路的交汇点，其对外辐射能力较强。2019年，乌鲁木齐、银川经济联系总量均大于70，在核心区域的辐射带动下，外围城市哈密、吐鲁番、吴忠、中卫经济联系也愈发增强。边缘地区以及连片的自治州其可达性一直处于弱势地位，且受到核心城市的辐射较小，经济潜力排名靠后。

青海省内经济联系均衡性较差，省内东部与西部地带梯度差异显著。2011年，西宁经济联系总量仅为10.80。2015年，得益于兰新高铁的开通，西宁的经济联系总量提升率近11倍。青海省内东部城市经济排名均处在前列，反观省内西部地带，成片的自治州由于铁路可达性较低，以及地理条件的限制，受到核心城市的经济辐射较弱，经济始终处于劣势地位。

3.2 空间相互作用时空分布差异

3.2.1 经济联系总量分析 全区城间经济联系总量总体上东西梯度差异显著，经济总量较大的城市集中在丝绸之路经济带沿线以及兰西、关中两大城市群，基本分布呈"带状"型。由于陕西省高铁网络密集程度相对较高，以及特大城市西安强大的经济辐射能力，邻近西安的部分城市经济联系总量大于部分省会城市，西安、咸阳、渭南、宝鸡经济联系总量始终排名前列，排名靠后的主要是西部城市。2019年，西安经济联系总量占区域经济联系总量的45.44%。咸阳、渭南经济联系总量分别占比25.65%、15.96%。边缘地区由于地理位置属性，可达性程度不高，作为省会的乌鲁木齐，其经济联系总量也仅占比0.64%。

高速铁路巨大的时空压缩效应促进了城间作用度质的飞跃，"廊道"效应明显。兰新高铁开通后，各城市经济联系总量有了很大的提高，但各城市存在明显差异，高铁沿线城市乌鲁木齐、海东等经济排名跻身前列。2015—2019年，天水和定西得益于宝兰客专等高铁线路的开通，经济联系总量提升率也均在6倍以上。

3.2.2 经济联系强度方向分析 为进一步分析城市间相互作用格局，借助GIS软件绘制经济联系强度如图2、图3、图4所示，图中仅显示经济联系强度大于0.1的连线。

综合分析图和表，2011年，城市间经济联系较好的均为各省（自治区）内部城市之间，跨省（自治区）的联系相对较弱，排名前5的是西安—咸阳、西安—渭南、西安—宝鸡、宝鸡—咸阳、咸阳—渭南。2015年，兰新高铁开通后，省外联系明显加强，经济联系紧密的城市已不仅仅局限于省内各城市，而是

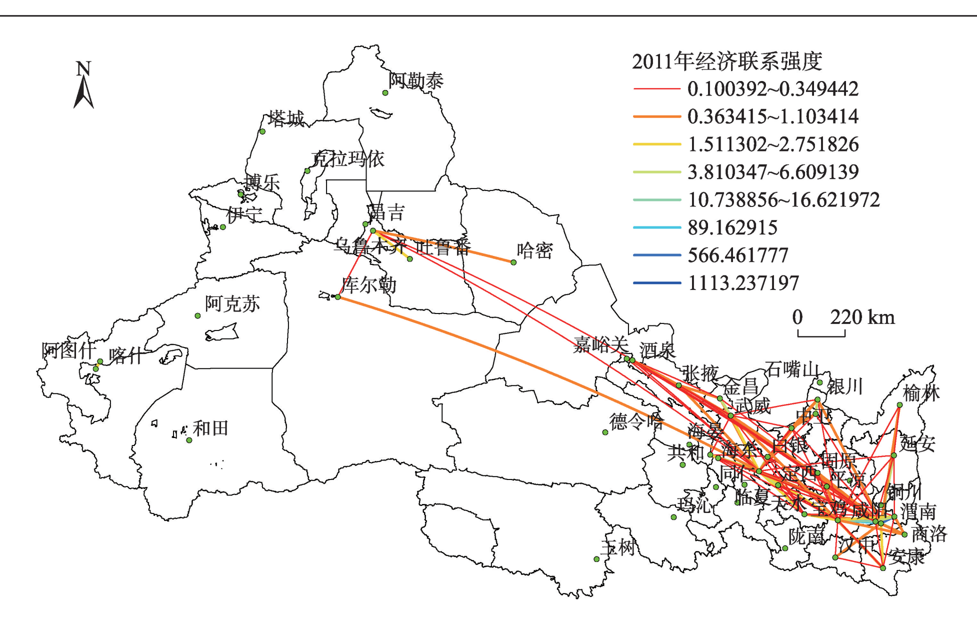


图2　2011年西北地区主要城市经济联系强度示意图

Fig. 2　Schematic diagram of economic connection intensity of major cities in northwest China in 2011

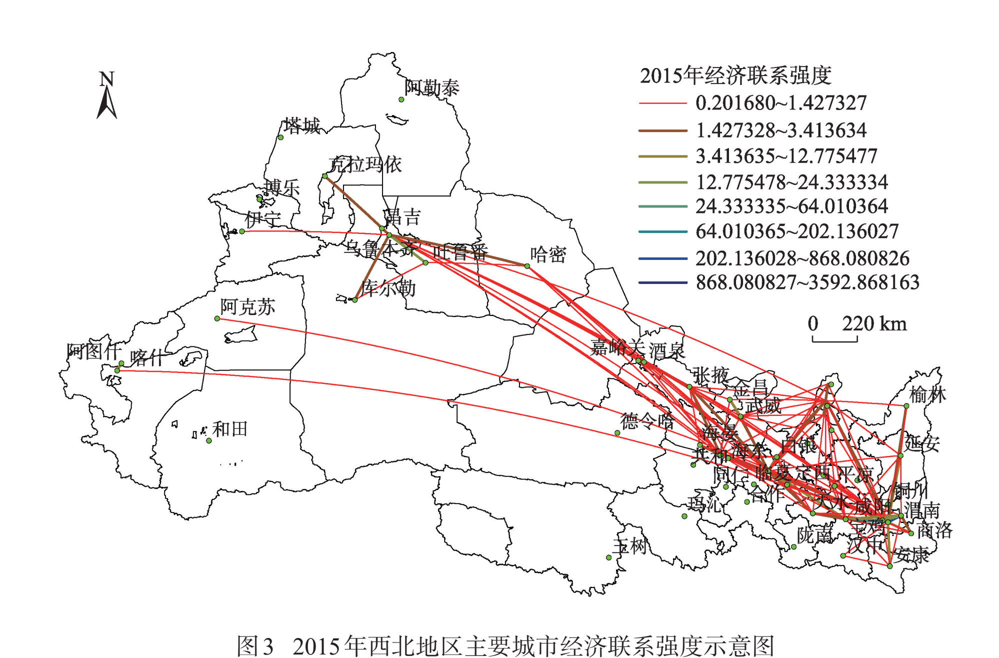


图3　2015年西北地区主要城市经济联系强度示意图

Fig. 3　Schematic diagram of economic connection intensity of major cities in northwest China in 2015

逐步向省外城市蔓延。经济联系呈现“走廊式”分布。西宁—海东、兰州—西宁、酒泉—嘉峪关、兰州—海东等高铁沿线城市之间经济联系强度均大幅提升，强度均在200以上。2019年，这一格局被进一步改变，西安—兰州经济联系强度达825，由第13位上升至第4位。西安—天水、天水—宝鸡、兰州—天水、兰州—定西受益于中川城际、宝兰客专的开通以及区域一体化的建设，经济联系愈发紧密，由此可见高铁对提升空间作用度的影响不容忽视。

4　结论与讨论

近年来，随着西北地区高速铁路的新增、城市间列车频次密度的增加，城市铁路可达性及空间相互格局都呈现出明显的总体特征和时空分异现象。

（1）铁路可达性总体东西“梯度”差异显著。西北地区整体铁路可达性提升明显，但呈现出明显的东西梯度差异，沿着河西走廊，兰州以西地区较关中地区而言，无论是铁路网覆盖率还是路网功能结

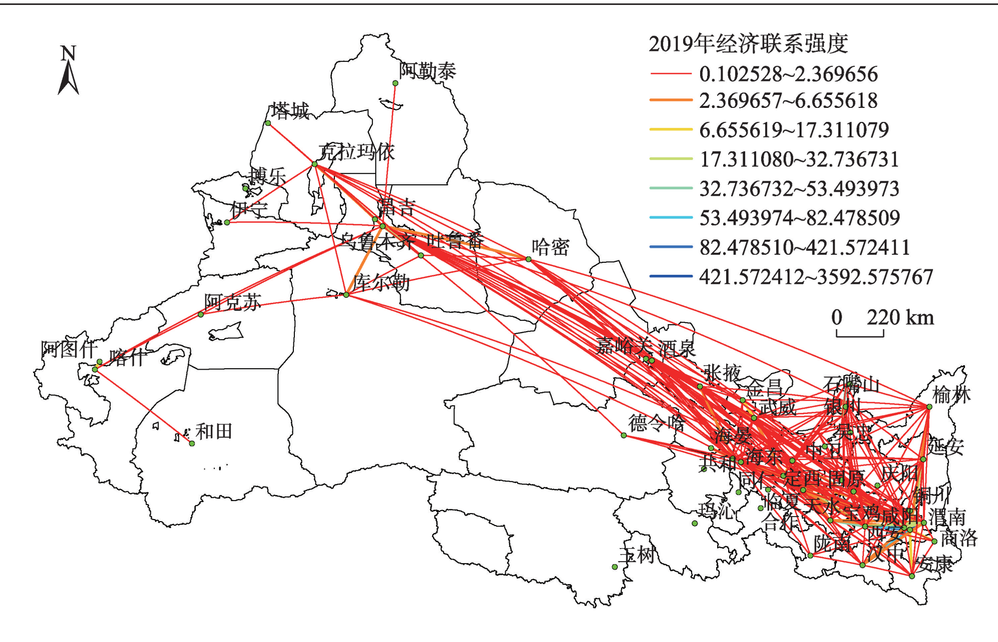


图4 2019年西北地区主要城市经济联系强度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of economic connection intensity of major cities in northwest China in 2019

构都存在较大的差距。各省(自治区)铁路可达性较好的区域主要集中在经济较为发达的省会城市及其周围,以省会城市为核心,以铁路枢纽城市为次核心,依据距离衰减原则,越靠近核心节点的城市,其铁路可达性越好。

(2) 高速铁路影响范围"廊道"效应明显。高铁沿线城市铁路可达性较好。2015年,沿线乌鲁木齐、张掖铁路可达性提升率分别为83.13%和81.28%,提升率均为地区平均水平的2倍。宝兰客专的运营使得兰州与天水、定西、西安和宝鸡等城市联系愈发紧密,部分城市铁路可达性提升率高达2倍。玉树、甘南和果洛等边缘城市由于尚未融入高铁网络,铁路可达性面临有可能被边缘化的危险,铁路可达性"核心—边缘"格局日益强化。此外,铁路可达性变化与列车频次数相关性较强。

(3) 经济联系格局由"点轴式"向"网络式"转变。空间相互作用格局总体上由传统的"极核"模式,转变为以中心城市或高速铁路的交汇城市为节点向周边辐射扩散,以陇海线、兰新线、宝兰线等主干铁路为轴线纵向延伸的"点—轴"模式,继而初步形成了一定的"网络"格局。区域整体经济联系强度日益增强,原来以省内联系为主的经济联系格局日益改变,逐步向省外城市蔓延。哈密、吐鲁番、克拉玛依、石河子等也已跻身核心城市行列,对外辐射量增长明显,但区域内部存在着明显的变化差异,高铁沿线城市的提升率远远高于边缘城市,极化效应明显。此外,地区城市间经济联系强度空间差异显著,具有明显的东西梯度差异,联系紧密的城市集中在丝绸之路经济带沿线以及兰西、关中两大城市群,基本分布呈"带状"型。

鉴于西北地区典型的东西梯度差异,建议应该进一步加强铁路建设,尤其是扩大边缘地区铁路网覆盖面,统筹东西梯度发展,推动城间均衡融合发展。对于被高铁边缘化的一些非沿线城市需要加强与沿线城市的交通接驳建设,积极主动融入高铁网络,利用高速铁路的便利性,提升自身铁路可达性水平和空间作用度。此外由于铁路可达性与列车频次相关性较强,所以应结合不同区域和城市实际情况,对各城市的铁路站点规模、城市间列车开行频次进行合理规划及分配。

参考文献(References)

[1] 刘生龙, 胡鞍钢. 交通基础设施与中国区域经济一体化[J]. 经济研究, 2011, 46(3): 72-82. [Liu Shenglong, Hu Angang. Transportation infrastructure and regional economic integration in China[J]. Economic Research Journal, 2011, 46(3): 72-82.]

[2] 潘少奇, 李亚婷, 高建华. 中原经济区经济联系网络空间格局[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 92-101. [Pan Shaoqi, Li Yating, Gao Jianhua. Spatial pattern of economic linkage network in central plains economic zone[J]. Progress in Geography, 2014, 33(1): 92-101.]

[3] 刘静玉, 杨虎乐, 宋琼, 等. 中原经济区城市间相互作用时空格局演变研究[J]. 地理科学, 2014, 34(9): 1060−1068. [Liu Jingyu, Yang Hule, Song Qiong, et al. Spatio-temporal pattern evolution of the interaction among the cities in Central Plains Economic Zone [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(9): 1060−1068.]

[4] 徐维祥, 陈斌, 李一曼. 基于陆路交通的浙江省城市可达性及经济联系研究[J]. 经济地理, 2013, 33(12): 49−53. [Xu Weixiang, Chen Bin, Li Yiman. The accessibility and economic linkage of urban areas in Zhejiang Province based on land communication[J]. Economic Geography, 2013, 33(12): 49−53.]

[5] 王姣娥, 焦敬娟, 金凤君. 高速铁路对中国城市空间相互作用强度的影响[J]. 地理学报, 2014, 69(12): 1833−1846. [Wang Jiao'e, Jiao Jingjuan, Jin Fengjun. Spatial effects of high-speed rails on interurban economic linkages in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(12): 1833−1846.]

[6] 覃成林, 刘万琪, 贾善铭. 中国铁路交通发展对沿线城市经济增长趋同的影响[J]. 技术经济, 2015, 34(3): 51−57, 76. [Qin Chenglin, Liu Wanqi, Jia Shanming. Impact of railway transportation development on convergence of economic growth of cities along railway[J]. Technology Economics, 2015, 34(3): 51−57, 76.]

[7] 叶燕霞. 高铁可达性对广东省经济的影响研究——基于省内省际的可达性面板数据[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. [Ye Yanxia. Research on the impact of high-speed rail accessibility on economy of Guangdong Province: Based on provincial and interprovincial accessibility panel data[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.]

[8] 周倩, 吴柏燕, 李朝奎, 等. 长株潭城市群路网可达性与经济发展水平空间耦合协调度分析[J]. 地理信息世界, 2020, 27(3): 70−76. [Zhou Qian, Wu Baiyan, Li Chaokui, et al. Spatial coupling and coordination degree analysis on road network accessibility and economic development level of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Geomatics World, 2020, 27(3): 70−76.]

[9] 鄢慧丽, 王强, 熊浩, 等. 中国"四纵四横"高铁对沿线站点城市可达性及其经济联系的影响[J]. 经济地理, 2020, 40(1): 57−67. [Yan Huili, Wang Qiang, Xiong Hao, et al. The effect of Chinese "Four Vertical and Four Horizontal" high-speed railways on the accessibility and economic relations of the cities along the line[J]. Economic Geography, 2020, 40(1): 57−67.]

[10] 效瑞, 白永平, 车磊, 等. 兰新高铁沿线县域可达性时空收敛效应与经济潜力特征分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 831−838. [Xiao Rui, Bai Yongping, Che Lei, et al. Effect of time-space convergence and economic potential characteristics of county accessibility along the Lanzhou-Xinjiang high-speed railway[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 831−838.]

[11] 高玉祥, 董晓峰, 梁颖. 基于GIS的宁夏路网空间特征研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 268−276. [Gao Yuxiang, Dong Xiaofeng, Liang Ying. Spatial features of road networks in Ningxia based on GIS[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 268−276.]

[12] 马卫. 西北地区可达性时空演变及其对经济发展的影响研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015. [Ma Wei. Research on temporal-spatial pattern of accessibility and its effect on economic development of the northwest[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2015.]

[13] 唐恩斌, 张梅青. 高铁背景下城市铁路可达性与空间相互作用格局——以江西省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2241−2249. [Tang Enbin, Zhang Meiqing. Urban rail accessibility and interurban spatial effects on the background of high-speed rail in Jiangxi Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(10): 2241−2249.]

[14] 宗会明, 黄言. 高速铁路对成渝城市群区域可达性和城市相互作用格局的影响[J]. 人文地理, 2019, 34(3): 99−107, 127. [Zong Huiming, Huang Yan. The impact of high-speed rail on regional accessibility and regional spatial interactions: A case study of Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. Human Geography, 2019, 34(3): 99−107, 127.]

[15] 孟德友, 陆玉麒. 基于铁路客运网络的省际可达性及经济联系格局[J]. 地理研究, 2012, 31(1): 107−122. [Meng Deyou, Lu Yuqi. Analysis of inter-provincial accessibility and economic linkage spatial pattern based on the railway network[J]. Geographical Research, 2012, 31(1): 107−122.]

[16] 杨晓敏, 李玲琴, 付建新, 等. 30 a青海省公路可达性及县域经济联系格局演化[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1376−1387. [Yang Xiaomin, Li Lingqin, Fu Jianxin, et al. Pattern variation of accessibility and economic linkage at county scale in Qinghai Province from 1986 to 2016[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1376−1387.]

Railway accessibility and spatial interaction pattern change in northwest China in the background of high speed rail

ZHANG Futao, QIAN Yongsheng, ZENG Junwei, GUANG Xiaoping

(School of Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Northwest China is an important juncture of the Silk Road Economic Belt. Considering the heterogeneity of railway traffic flow in different cities, with the main cities in the northwestern region as the research unit, and the important high-speed line openings in 2011, 2015, and 2019 as time points, using the accessibility of the train frequency measurement method and the standard gravitational model, and adopting the frequency-weighted average travel time of trains and the total economic ties and economic indices of the contact strength, the accessibility of railways and the urban spatial interaction are analyzed. The results indicate the following. (1) Railway accessibility and the strength of the economic connection between cities have significantly improved overall, especially along the high-speed railway, which is greatly affected by the train frequency. (2) Railway accessibility in the entire region has a significant gradient from east to west and gradually decreases in the northwest direction. In some provinces (autonomous regions), a circular structure is centered on the provincial capital city and sub-centered on the railway hub city. (3) The spatial interaction in the entire region has changed from the traditional "polar core" pattern to a "point-axis" pattern with the hub cities as nodes and the main railways, such as the Longhai, Baoji-Lanzhou, and Lanzhou-Xinjiang railways, as longitudinal axes, forming a "network" pattern. Within the provinces (autonomous regions), the "regional central city-peripheral city-marginal city" economic connection total gradient structure is obvious. It is suggested that railway construction be further strengthened; in particular, the coverage of the railway network in marginal areas should be expanded and the east-west gradient development should be coordinated. Cities along non-high-speed railway lines should strengthen their transportation connections with cities along the railway lines and actively integrate into the high-speed railway network.

Key words: high-speed railway; railway accessibility; spatial interaction; northwest territories